

PDF hosted at the Radboud Repository of the Radboud University Nijmegen

The following full text is a publisher's version.

For additional information about this publication click this link.

<http://hdl.handle.net/2066/200026>

Please be advised that this information was generated on 2019-06-02 and may be subject to change.

De aantrekkingskracht van zwarte gaten

INAUGURELE REDE DOOR PROF. DR. PETER G. JONKER

•
in au
gurele
redo

change perspective

Radboud Universiteit



INAUGURELE REDE

PROF. DR. PETER G. JONKER



In een samenleving met een groeiende kloof tussen groepen van verschillende opleidingsniveaus staat de acceptatie van de wetenschappelijke methode en haar uitkomsten onder druk. Daarentegen spreken zwarte gaten zeer tot de verbeelding. Deze fascinatie, als waarden-vrij onderwerp, kan een

belangrijke rol spelen in de herwaardering van de wetenschap. Tegelijkertijd verwachten we dat zulk onderzoek kan bijdragen aan het vergroten van de studentenaantallen in de bètawetenschappen; eveneens een welkom effect.

Voor het onderzoeksveld zijn zwarte gaten aantrekkelijk omdat zij - als ultieme testomgeving voor de voorspellingen van Einsteins algemene relativiteits-theorie - een centrale rol spelen binnen de theoretische natuurkunde en de astrofysica. Gezien de recente doorbraken in het onderzoek naar zwaartekrachtsgolven, en de voorspelde faciliteiten als de röntgensatelliet Athena, de gravitatiegolfdetectoren LISA en de Einstein Telescoop, staat dit onderzoeksveld aan de vooravond van een golf van ontdekkingen.

Peter Jonker (Amersfoort, 1973) studeerde Astrofysica aan de Universiteit Utrecht en promoveerde aan de Universiteit van Amsterdam. Daarna vertrok hij met een Marie Curie Fellowship naar het Institute of Astronomy, University of Cambridge en met een NASA Chandra Fellowship naar het Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Vanaf 2005 werkt hij bij SRON Netherlands Institute for Space Research, Utrecht, en tot 2014 was hij ook als gast-onderzoeker aan het Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge verbonden.

Radboud Universiteit



DE AANTREKKINGSKRACHT VAN ZWARTE GATEN

De aantrekkingskracht van zwarte gaten

*Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van bijzonder hoogleraar
Observationele hoge-energie astrofysica aan de Radboud Universiteit op
vrijdag 16 november 2018*

door prof. dr. Peter G. Jonker

Opmaak en productie: Radboud Universiteit, Facilitair Bedrijf, Post & Print
Fotografie omslag: Bert Beelen

© Prof. dr. Peter G. Jonker, Nijmegen, 2018

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar worden gemaakt middels druk, fotokopie, microfilm, geluidsband of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de copyrighthouder.

*Dank u wel mevrouw de rector,
Goedemiddag familie, vrienden, collega's!*

Met mijn oratie vandaag wil ik u te laten zien dat sterrenkundig onderzoek aan zwarte gaten hoogtijdagen beleeft en gaat beleven en dat het een belangrijke rol kan vervullen voor de samenleving. Niet alleen in de vorm van economische vooruitgang, deze veel te beperkte graadmeter van nut, maar voornamelijk in enkele 'zachte' maar even zo belangrijke kanten van ons samenleven. De volgende quote van Stephen Hawking is zeer relevant, want de inhoud is helaas niet vanzelfsprekend voor iedereen, zie alleen maar de discussie over inenting en de hoeveelheid *fake news*: 'In a democratic society, everyone needs to have a basic understanding of science to make informed decisions about the future.'

Ik wil starten met iets te vertellen over hoe ik hier gekomen ben. Van de rector heeft u al iets over mijn CV gehoord maar daar wil ik dit nog aan toevoegen. Toen ik als 18-jarige werd getypeerd als non-conformist door mijn leraar Frans, kon ik daar wel in komen. Ik accepteerde deze geuzenaam graag en ik denk dat dit een waardevolle eigenschap van een onderzoeker kan zijn. Als iedereen een bepaalde kant op rent is het goed als er een paar mensen om zich heen kijken om zich af te vragen of dat wel de juiste richting is. Behalve een fascinatie voor de ruimte was een reden om sterrenkunde te gaan studeren dat het geen economisch nut leek te hebben; dit zal de non-conformist in mij zijn geweest na periodes van no-nonsense kabinetten van Lubbers. Zoals veel van mijn collega's hier aanwezig heb ik sterrenkunde gestudeerd in Utrecht. Dat kon toen nog. Ik moet zeggen dat ik de opleiding best pittig vond, zeker de overgang van voortgezet onderwijs naar de universiteit vond ik lastig. Maar twee eerstejaarsvakken sterrenkunde gegeven door mijn collega's Frank Verbunt en Bram Achterberg, beiden nu werkzaam aan de Radboud Universiteit, waren werkelijk hoogtepunten van het eerste jaar. Zowel de natuurkunde- als de sterrenkundevakken in de gehele opleiding hebben mijn nieuwsgierigheid naar de sterrenkunde vergroot. Mijn volgende thuis in de wetenschap vond ik aan de UvA tijdens mijn promotieonderzoek onder leiding van Michiel van der Klis. De intellectuele ruimte en stimulans die ik daar heb mogen ervaren is iets wat ik hoop te kunnen benaderen in mijn eigen onderzoeksgroep. Ik vind dat in de sterrenkundegroep aan de Radboud Universiteit een vergelijkbare sfeer heerst, wellicht niet gek als je bedenkt dat zowel het huidige afdelingshoofd, Gijs Nelemans, als ook het vorige, Paul Groot, uit de 'Amsterdamse school' komen.

ZWARTE GATEN EN DE SAMENLEVING

Nu terug naar de titel van mijn oratie: *De aantrekkingskracht van zwarte gaten*. De letterlijke betekenis zal ik zo nog uitgebreid bespreken. Zoals blijkt uit het feit dat zwarte gaten een prominente plek op de voorkant van het Volkskrant magazine van september 2018 innamen (en ook in de inhoud van dat septembernummer spelen zwarte gaten

een belangrijke rol), is de aantrekkingskracht van zwarte gaten op het publiek nog steeds zeer groot. Dit ligt denk ik, in de combinatie van het mystieke: Kun je tijdreizen via zwarte gaten? Kunnen we zwarte gaten gebruiken voor ruimtereizen? En de harde wetenschap. Een bijkomend voordeel is dat al het sterrenkundig onderzoek a-politiek is. Sterren, melkwegstelsels, zwarte gaten; ze zijn van iedereen, ongeacht geloof of afkomst. Dit wordt prachtig weergegeven in de slogan van de Internationale Astronomische Unie die dit jaar haar 100-jarig bestaan viert: 'Under one sky'.

Deze kracht van de sterrenkunde zouden we meer moeten inzetten om de huidige problemen in onze samenleving te helpen oplossen. Zoals in een rapport van het Sociaal en Cultureel Planbureau staat is een van de uitdagingen voor de samenleving het tegengaan van de groeiende kloof tussen arm en rijk, laag- en hoogopgeleid. Hieraan gerelateerd volgens mij is, dat een grote groep mensen de wetenschappelijke methode niet meer als *de* manier om tot vooruitgang te komen ziet. Het is natuurlijk de vraag of we deze groep zullen bereiken met onderzoek aan zwarte gaten maar het is het proberen waard. Voor het oplossen van andere problemen waar onze samenleving zich voor ziet gesteld, zoals klimaat problematiek, zijn ook mensen met een bèta-achtergrond dan wel -affiniteit vereist en uit zowel Nederlandse als ook ervaringen in het Verenigd Koninkrijk weten we dat een sterrenkunde component studenten trekt naar de opleiding Natuur- en Sterrenkunde. Dus laten we deze kracht gebruiken om meer mensen een bèta-opleiding te laten doorlopen.

Wellicht ten overvloede: kernpunten van de wetenschappelijke methode zijn in mijn optiek de vereiste om alle aannames, alle verkregen data, en alle resultaten te onderzoeken op fouten. Vervolgens dienen de resultaten vergeleken te worden met het te toetsen model of hypothese, waarna een waarschijnlijkheid geformuleerd wordt die aangeeft of de gegevens de hypothese ondersteunen. Doordat wetenschappers waarschijnlijkheden gebruiken is er altijd ruimte voor een verschillende, persoonlijke, weging van die waarschijnlijkheden. Dit houdt bijvoorbeeld in dat er ook onder wetenschappers altijd klimaatsceptici zullen zijn. Deze sceptici moeten we koesteren (hier spreekt de non-conformist). Beleidsmakers en politici zullen daarentegen moeten leren deze sceptici te negeren. Ik bedoel dat politici graag lijken te zoeken naar zekerheden om zich achter te verschuilen bij het nemen van beslissingen en zolang er geen zekerheid gegeven wordt, zullen ze niet overgegaan tot actie.

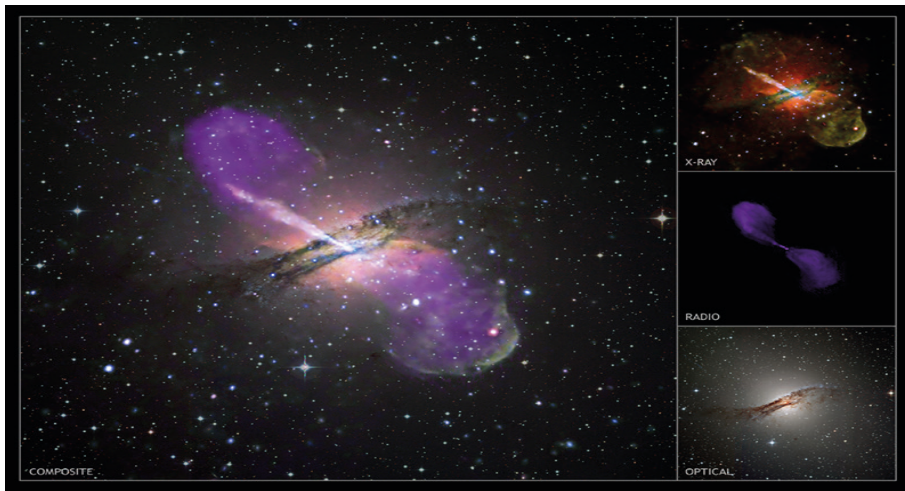
HOE ONTSTAAN ZWARTE GATEN?

Dit alles lijkt mij ver van zwarte gaten en de leeropdracht van mijn hoogleraarpositie te brengen. Ik zal aan het eind weer naar het thema van zwarte gaten en de samenleving terugkeren, maar nu eerst inhoudelijk ingaan op mijn onderzoek aan zwarte gaten en de relatie daarvan met mijn leeropdracht *Observationele hoge-energie astrofysica*.

Om te weten wat een zwart gat is moet ik iets van Einsteins relativiteitstheorie uitleggen. Sinds Einstein zijn algemene relativiteitstheorie formuleerde zien we zwaar-

tekracht als een gevolg van de kromming van de ruimte door massa. Alles, voorwerpen en mensen, licht, volgt de gekromde ruimte, dit voelt als een kracht. Dicht bij een zwart gat wordt de kromming van de ruimte zo sterk dat 'de bodem eruit valt', de afstand over de gekromde ruimte wordt oneindig groot, zelfs licht kan die afstand niet overbruggen. De grens van een zwart gat is de waarneemhorizon. Komt iets voorbij deze horizon dan kan het geen signalen meer uitwisselen met de rest van het heelal want, zoals gezegd, zelfs licht kan er niet meer uit.

De hoofdvraag van mijn onderzoek is: hoe ontstaan zwarte gaten? Daarbij is het goed om te weten dat er twee soorten zwarte gaten bekend zijn: kleine, stellaire zwarte gaten en superzware zwarte gaten. Van de kleine zijn er meer dan van de superzware, zo denken we. De kleine zwarte gaten hebben een massa van tussen de 5 en 100 keer zo zwaar als de zon. Hier ziet u dat astronomen de massa van de zon als eenheid gebruiken. We doen dit voornamelijk omdat de getallen anders zo groot worden. De zon weegt namelijk 2 met dertig nullen, kilogram. De superzware zwarte gaten hebben massa's van ongeveer een miljoen tot 10 miljard maal de massa van de zon en we vinden ze in de kernen van grote melkwegstelsels.



Figuur 1. Het figuur laat zien hoe we het melkwegstelsel Centaurus A waarnemen in zichtbaar-, in radio- en in röntgenlicht. Het centrale heldere object en de pluimen worden veroorzaakt door het centrale superzware zwarte gat in het centrum van dit melkwegstelsel (copyright: X-ray - NASA, CXC, R.Kraft (CfA), et al.; Radio - NSF, VLA, M.Hardcastle (U Hertfordshire) et al.; Optical - ESO, M.Rejkuba (ESO-Garching) et al).

Hier ziet u een sterrenstelsel in zichtbaar-, radio-, en röntgenlicht. Deze pluimvormige stralingsbundels worden gelanceerd vanuit de nabije omgeving van het superzware zwarte gat in dit sterrenstelsel. Uit het grote verschil tussen het beeld in radiostraling en

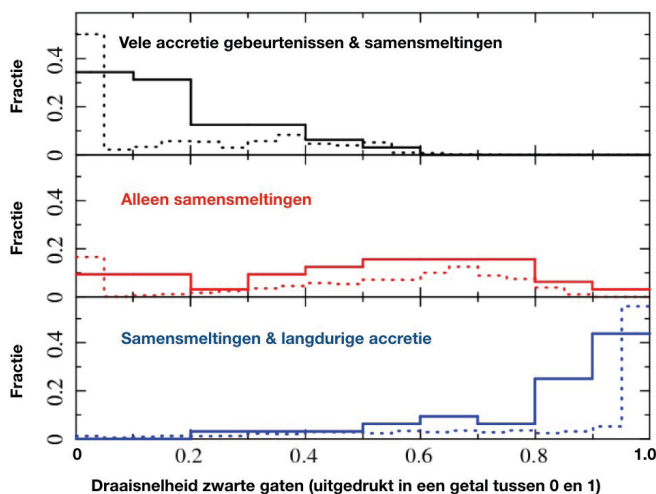
dat in zichtbaar licht blijkt, dat astronomen verschillende soorten licht, zichtbaar licht, radiolicht, röntgenlicht, enzovoort moeten gebruiken om een volledig beeld te krijgen van het heelal.

Over de vorming van zwarte gaten is nog veel onbekend. We denken dat een klein, stellair zwart gat ontstaat uit een zware ster. In sommige gevallen implodeert nagenoeg de hele ster tot een zwart gat en in andere gevallen implodeert alleen de kern van de ster. Maar we weten nog niet goed bij welke zware sterren de hele ster implodeert en bij welke alleen de kern. Wanneer alleen de kern implodeert worden de buitenste lagen van de ster weggeslingerd in een supernova-explosie.

Ons begrip van het ontstaan van superzwarte gaten is niet veel beter: het is duidelijk dat die zwarte gaten lichter beginnen en 'groeien' tot de massa die ze nu hebben. Maar of de groei gedomineerd wordt door het samensmelten met andere zwarte gaten, of door het opeten van gas en sterren, of via een combinatie van deze processen is onbekend.

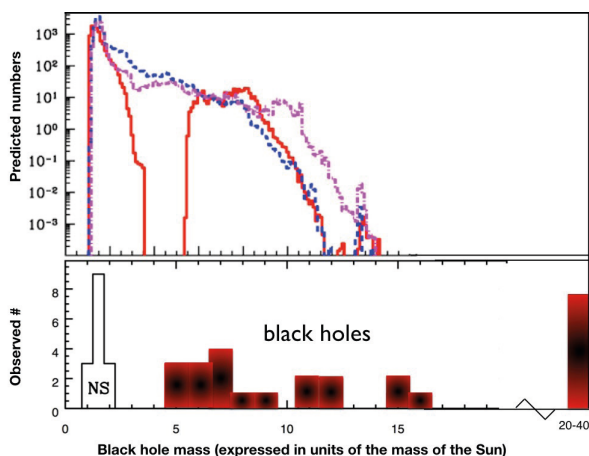
DE MASSA- EN DRAAISNELHEIDSVERDELING VAN ZWARTE GATEN

De verschillende mogelijk geachte vormingsprocessen van zwarte gaten leveren ieder een andere verdeling van de massa en draaisnelheid van zwarte gaten. Door de massa's en de draaiing van zwarte gaten te meten kunnen we de vormingsgeschiedenis achterhalen.



Figuur 2. Op de horizontale as staat de draaisnelheid van superzwarte zwarte gaten. De verticale as geeft de fractie van het totale aantal voor de drie modellen voor de vorming van superzwarte zwarte gaten (dit figuur is een bewerkte versie van het origineel gemaakt door dr. Giovanni Miniutti).

Allereest vertel ik iets over de draaisnelheid van superzware zwarte gaten. In het figuur staat de draaisnelheid van het zwarte gat op de X-as, horizontaal, waarbij de waarde 1 helemaal rechts, betekent dat het zwarte gat met een maximale snelheid om zijn as draait en de waarde 0, helemaal links op de X-as wordt toegekend aan zwarte gaten die niet draaien. Het figuur bestaat uit drie delen. Ieder deel laat de resulterende verdeling in de draaisnelheid van zwarte gaten zien uitgaande van drie verschillende groeiscenario's voor het ontstaan van superzware zwarte gaten. Het onderste figuur laat zien dat meer dan 20 procent van het totale aantal superzware zwarte gaten zeer snel zal draaien wanneer zij groeien door het langdurig opslokken van grote hoeveelheden gasdat aangeleverd wordt door een draaiende gasschijf. De draaiing van de schijf wordt dan overgedragen op het zwarte gat en die gaat dan geleidelijk sneller draaien. In een ander groeiscenario, weergegeven in het middelste figuur, ontstaat een superzwaar zwart gat uit het samensmelten van kleinere (stellaire) zwarte gaten. In dit tweede geval komen zwarte gaten die niet, nauwelijks, of snel draaien ongeveer in gelijke aantallen voor. Tenslotte, in het bovenste figuur ziet u de verwachte draaisnelheidsverdeling wanneer superzware zwarte gaten gegroeid zijn door kortdurende fases van het opslokken van gas en het af en toe samensmelten met andere zwarte gaten. In dat geval hebben ze voornamelijk lage draaisnelheden, met een piek bij langzaam tot niet draaiende gaten. Er wordt nu hard gewerkt aan een nieuwe röntgensatelliet, *Athena* geheten. Ook in Nederland werken wij daar hard aan bij het ruimteonderzoeksinstituut SRON, waar ik ook werkzaam ben. Deze nieuwe satelliet gaat de verdeling van draaisnelheden van zwarte gaten meten na de lancering in 2031.



Figuur 3. Op de horizontale as staat de massa van een stellair zwart gat. Op de verticale as staat het waargenomen (het onderste figuur) en het voorspelde aantal stellaire zwarte gaten. De drie verschillend gekleurde en getekende lijnen in het bovenste figuur geven de verdeling in de massa's voorspeld aan de hand van drie verschillende modellen voor de vorming van stellaire zwarte gaten en neutronensterren. De modellen gaan alle drie uit van een supernova explosie (dit figuur is een bewerkte versie van het origineel zoals gepubliceerd in Fryer 2013, *Classical and Quantum Gravity* Volume 30, Issue 24, Article ID 244002).

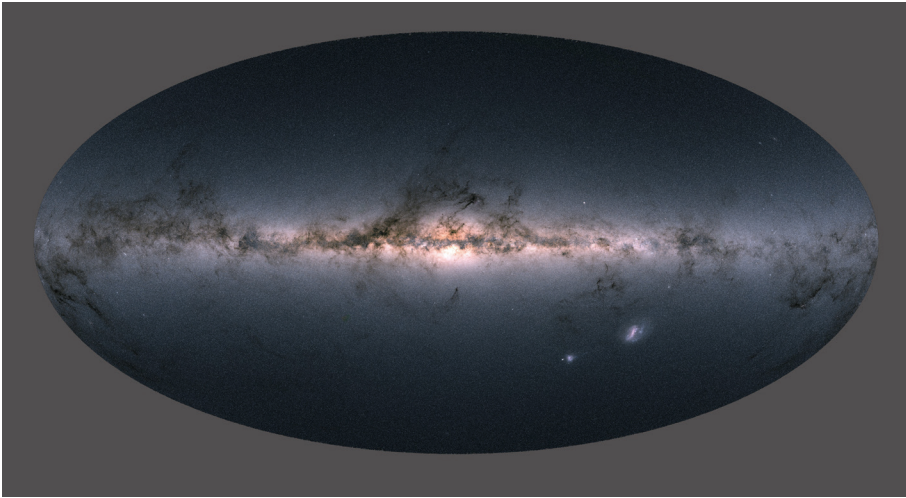
Behalve de verdeling van draaisnelheden kunnen we onze ideeën over de vorming van zwarte gaten testen door te kijken naar de massaverdeling. Hier ziet u de voorspelde massaverdeling volgens astronomen die de vorming van zwarte gaten via supernovaexplosies proberen te verklaren. De drie verschillend gekleurde lijnen in het bovenste deel van het figuur, zijn voor drie verschillende detailberekeningen voor supernovaexplosies. Behalve de verwachte verdeling ziet u in het onderste deel van het figuur de tot nu toe waargenomen verdeling van de massa's van stellaire zwarte gaten en zogenaamde neutronensterren. Neutronensterren zijn de broertjes en zusjes van stellaire zwarte gaten, het zijn zeer compacte sterretjes met een massa van tussen de een en twee keer de massa van de zon samengeperst in een bolletje met een straal van een kilometer of tien. Licht kan nog wel ontsnappen van neutronensterren. U ziet wellicht gelijk dat de voorspelde massaverdeling niet overeenkomt met de waargenomen verdeling die aangegeven wordt met de gekleurde blokken. Vandaar dat er ook nieuwe theorieën over de vorming van stellaire zwarte gaten bedacht zijn. Wellicht ziet u ook dat het aantal zwarte gaten waarvoor we de massa hebben kunnen meten gering is. Dit zal in de nabije toekomst gaan veranderen.

HOE VINDEN EN BESTUDEREN ASTRONOMEN ZWARTE GATEN?

U kunt zich afvragen hoe astronomen objecten kunnen bestuderen die zwart zijn in een heelal dat ook grotendeels zwart is. We kunnen sommige zwarte gaten bestuderen door hun befaamde aantrekkingskracht. Hierbij wil ik nog iets meer uitleggen: het bijzondere van een zwart gat is zijn omvang. Zwarte gaten zijn klein voor hun massa. Een zwart gat even zwaar als de zon heeft ongeveer een miljoen keer kleinere straal dan de zon. Dus terwijl je bij hemellichamen zoals de zon en aarde op een oppervlak valt, kun je bij een zwart gat een miljoen keer verder vallen. Hierin zit de kern van de zaak: doordat een zwart gat zo klein maar wel heel zwaar is, kan materie die naar een zwart gat valt veel verder vallen dan materie die op een oppervlak zoals het aard- of een steroppervlak valt. Hierdoor wordt de snelheid van de vallende materie uiteindelijk nagenoeg gelijk aan de lichtsnelheid en wanneer door wrijving tussen zulke snel bewegende deeltjes warmte wordt uitgestraald kan tot wel 40 procent van de massa (m) van zo'n deeltje worden uitgezonden als energie via de beroemde formule $E=mc^2$. Hier is c^2 de lichtsnelheid in het kwadraat. Doordat dit een zeer groot getal is komt er dus veel energie vrij. Er worden zulke grote hoeveelheden energie uitgestraald dat wij de materie rond zwarte gaten die gas en sterren opeten helder zien schijnen. Nu begrijpt u waar de 'hoge energie' van de leeropdracht vandaan komt en waarom we sommige zwarte gaten toch kunnen 'zien'.

Nu zal ik nog uitleggen waar de term 'observationeel' in mijn leeropdracht vandaan komt. Anders dan natuur- of scheikundigen hebben de meeste astrofysici geen laboratorium op hun instituut. Als wij willen onderzoeken hoe zwarte gaten gevormd worden kunnen wij niet aan laboratoriuminstellingen draaien om te uit te vinden wel-

ke parameter van belang is en welke niet. Gelukkig hebben wij zeer veel laboratoria in de ruimte.



Figuur 4. De gehele sterrenhemel zoals gezien door de Gaia satelliet van de Europese ruimtevaartorganisatie ESA. Donker wolken van gas en stof, de helder band van sterren van ons eigen melkwegstelsel en twee kleinere sterrenstelsels de Grote en Kleine Magelhaense wolk zijn zichtbaar (copyright ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0).

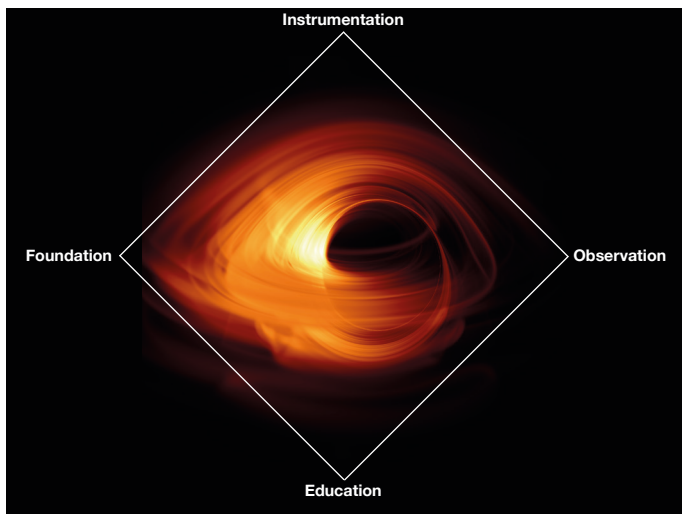
Hier ziet u ons eigen melkwegstelsel, zoals gezien door de *Gaia* satelliet. U ziet donkere wolken van stof en gas, een verdikking naar het centrum van het melkwegcentrum toe en twee kleinere sterrenstelsels, de grote en kleine Magelhaense wolk. Ons melkwegstelsel bevat een superzwaar zwart gat en naar schatting 10 tot 100 miljoen kleine zwarte gaten. Dit zijn er zoveel dat voor astronomen geldt: hoe kiezen wij het juiste laboratorium? En met welke telescoop of satelliet kunnen wij dit laboratorium het best bestuderen? Het kiezen uit alle mogelijkheden vereist de kunde van de observatieel astronoom.

Voorheen, en nog steeds, geldt dat veel astronomen zichzelf zullen benoemen aan de hand van de golflengte van het licht dat ze gebruiken om hun object van keuze te bestuderen: ze zijn een optische astronoom of een röntgenastronoom, een radio astronoom *etcetera*. In mijn ervaring is het juist interessant om de verschillende inzichten die geleverd worden door de metingen in verschillende golflengten te combineren. Nieuwe ontwikkelingen stellen ons in staat gebruik te maken van alle soorten licht en ook zelfs andere signalen zoals zwaartekrachtgolven en materiedeeltjes die uitgezonden worden bij gebeurtenissen waarbij zwarte gaten betrokken zijn.

NIEUWE ONTWIKKELINGEN

Wat zijn dan die nieuwe ontwikkelingen? De meest revolutionaire ontwikkeling is dat sinds september 2015 zwaartekrachtgolven kunnen worden gedetecteerd. Ik ben enkele jaren geleden op bezoek geweest bij een van de zwaartekrachtsdetectoren van LIGO. Deze nieuwe detectoren hebben bijvoorbeeld zwaartekrachtgolven waargenomen van twee zwarte gaten die samensmelten. De massa van de zwarte gaten kan worden afgeleid uit de zwaartekrachtgolven.

Vooruitgang in de sterrenkunde wordt voor een groot deel gedreven door nieuwe technologische mogelijkheden, zoals ook hier. Een andere verandering, die al een tijd gaande is, is dat de instrumentatie en de geproduceerde data steeds complexer worden. Dit leidt ertoe dat een nieuw soort positie is ontstaan; namelijk die van instrument-, dan wel, data-expert. Veelal zitten die experts bij de observatoria of consortia die het instrument ontwikkelen en gebouwd hebben. Observatoria en ruimtevaartorganisaties herkennen veelal de noodzaak om de data die uit dit soort complexe instrumentatie voortkomt op een voor astronomen direct te gebruiken manier beschikbaar te maken. Dit soort ‘tussen-personen’ stellen astronomen in staat de data beter en sneller te interpreteren. Een uitgelezen voorbeeld hiervan is de *Gaia* satelliet en zijn gegevens. Deze worden geanalyseerd en beschikbaar gemaakt door een consortium van experts geleid door de Nederlandse astronoom Anthony Brown. Ik en enkele mensen van mijn team zijn hier ook een klein radertje van.



Figuur 5. Het logo van ons voorstel zoals recent ingediend in het kader van de Nationale Wetenschapsagenda voor interdisciplinair onderzoek aan zwarte gaten (PIs Vandoren & Jonker). In de achtergrond ziet u de simulatie van de schaduw van een zwart gat. De simulatie is gedaan door Thomas Bronzwaer, Jordi Davelaar, Monika Moscibrodzka en Heino Falcke van de Radboud Universiteit.

Tevens worden er steeds meer samenwerkingsverbanden aangegaan met andere disciplines. Bij onderzoek aan zwarte gaten is hier zeker winst te behalen. Ik ben mede-hoofdaanvrager op een voorstel met de titel 'het Nederlands Zwarte Gaten Consortium'. Hier werken astronomen, theoretisch natuurkundigen, wiskundigen, filosofen, onderwijsdeskundigen en technici samen aan het vergroten van de kennis over zwarte gaten, waarbij deze kennis educatie en wetenschapscommunicatie stimuleert.

In dat voorstel hebben wij dit figuur opgenomen waarin we de onderlinge verbanden tussen de vier pijlers onder ons voorstel proberen uit te drukken. Op de achtergrond ziet u een simulatie van hoe we verwachten dat de schaduw van een waarneemhorizon bij een zwart gat er uit ziet. De simulatie is hier aan de Radboud Universiteit gedaan door Thomas Bronzwaer, Jordi Davelaar, Monika Moscibrodzka en Heino Falcke.

Een andere verandering is dat er steeds meer data per astronoom beschikbaar komen. Een wetenschapper werkzaam bij de Europese Zuidelijke Sterrenwacht heeft uitgerekend dat een astronoom per jaar nu ongeveer 70 Gigabites aan data gebruikt, maar in 2025-2030 zal dit ongeveer duizend keer zoveel zijn, waardoor we steeds meer een astronomentekort zullen krijgen. De oplossing ligt denk ik deels in het gebruiken van slimmere manieren om de data te doorzoeken. Technieken ontwikkeld voor het doorzoeken van zogenaamde 'big data' maken gebruik van artificiële intelligentie.

Het meer en meer gebruiken van artificiële intelligentie in de analyse van astronomische data vereist dat wij onze opleiding hier ook verder aan zullen aanpassen, en wellicht zullen we zelfs over een speciale Masterafstudeerrichting kunnen nadenken. Hier ligt een kans om de samenwerking met de opleiding Wiskunde en Computer Science te vergroten, aangezien zij bekend zijn met de achtergrond en de meest recente implementaties. Zo'n Masterafstudeerrichting maakt sterrenkunde denk ik nog interessanter voor studenten. Vele studenten sterrenkunde zullen, net als nu overigens, een baan buiten de sterrenkunde vinden, en daar vinden deze 'data scientist' kwaliteiten gretig aftrek. Een ander aspect waardoor afgestudeerde sterrenkundigen aantrekkelijke werknemers zijn, is de ervaring en de mogelijkheid om in complexe vraagstukken op zoek te gaan naar de hoofdzaken. Mijn collega Sterl Phinney op Caltech geeft sinds 1989 een college over het schatten van belangrijke aspecten in problemen, bijvoorbeeld: 'Schat de hoeveelheid leer die vrijkomt bij de productie van hamburgers in Nederland. En waar wordt dat leer voornamelijk voor gebruikt? Schoenen, jassen, handtassen, autostoelen?'

De artificiële intelligentie en big-data-wetenschap heeft ons astronomen nu al nieuwe laboratoria ter bestudering van zwarte gaten opgeleverd. Deze technieken worden gebruikt om de enorme hoeveelheid gegevens te doorzoeken die zogenaamde survey telescopen genereren. Survey telescopen bekijken een groot deel van de hemel in een keer en hierdoor kunnen kortdurende verschijnselen worden gevonden. Bijvoorbeeld, een supernovaexplosie waarin een zwart gat of een neutronenster gevormd wordt geeft

een grote, kortstondige toename van de hoeveelheid licht. Dit soort gebeurtenissen die we maar kort kunnen zien doordat ze opvlammen en uitdoven noemen we transients. De *Gaia* satelliet die ik net al noemde vindt vele honderden transients per jaar.

De mogelijkheid om op grote schaal te zoeken naar dit soort transients is één van de grote veranderingen die nu aan de gang is. Het team dat de *Gaia* transients vindt en rapporteert, maakt gebruik van artificiële intelligentie om de transients te classificeren. Hierdoor kunnen sommige veelvoorkomende maar minder interessante transients makkelijk uit de datastroom gehaald worden zodat schaarse middelen zoals telescoop-tijd niet onnodig worden gebruikt. Mensen uit mijn team en ik zoeken in de gegevens van de *Gaia* satelliet naar signalen van sterren die door zwarte gaten uit elkaar worden getrokken door getijdekrachten. Getijdenkrachten zijn het verschil in zwaartekracht uitgeoefend door het zwart gat tussen de kant van de ster die het dichtst bij het zwarte gat zit en de zwaartekracht aan de andere kant van de ster.



Figuur 6. Doordat de aantrekkingskracht bij een zwart gat snel toeneemt wanneer de afstand kleiner wordt, wordt alles, dus ook een astronaut, sterk uitgerekt. De zwaartekracht die hij/zij voelt op zijn/haar voeten is groter dan die die ervaren wordt bij het hoofd. Dit leidt tot spaghettificatie. Figuur van Wikipedia gemaakt door cosmocurio.

Dit uit elkaar trekken wordt ook wel ‘spaghettificatie’ genoemd en het effect is hier getekend voor astronauten. Hoe dichterbij een zwart gat, des te groter zijn de getijdekrachten. Wanneer een ster door een zwart gat uit elkaar getrokken wordt valt er in korte tijd zeer veel materie naar het zwarte gat, en zoals u al weet komt daar dan veel licht bij vrij: een zogenaamde getijdeflits. Dit soort getijdeflitsen stellen ons in staat te ontdekken waar zwarte gaten zich bevinden. Door het bestuderen van het licht dat vrijkomt kunnen we vervolgens te weten komen wat de massa en de draaisnelheid van dat zwarte gat is.

DE BLACKGEM TELESCOOP EN KORTSTONDIGE LICHTFLITSEN

Het aantal waarnemingen van deze getijdeflitsen neemt snel toe en binnenkort zal de Nederlands-Belgische BlackGEM-telescoop hier een belangrijke bijdrage aan gaan leveren. De BlackGEM telescopen zijn drie telescopen die worden gebouwd door mijn collega's Paul Groot en Steven Bloemen. De telescopen hebben een groot beeldveld en ze zijn gefinancierd door de Radboud Universiteit, de Nederlandse Onderzoeksschool voor Astronomie NOVA, en de Katholieke Universiteit Leuven.

Hier zien we een foto van het observatorium La Silla in Chili, waar de BlackGEM telescopen zullen worden neergezet in januari/februari van 2019.



Figuur 7. Foto tijdens zonsondergang van de La Silla bergtop in Chili waar de drie BlackGEM telescopen geïnstalleerd worden (credit ESO/B. Tafreshi (twanight.org)).

De foto heeft een haast mystieke uitstraling en dat is een van de redenen waarom ik zelf zo van waarnemen houd, de sfeer op een observatorium rond zonsondergang is zeer speciaal. En gedurende de nacht besef je dat je verschijnselen misschien wel voor het eerst aan het waarnemen bent. Hoewel het mystieke gevoel om 5 uur 's ochtends of tijdens bewolkte nachten wel snel afneemt.

Ik coördineer het team van geïnteresseerde wetenschappers voor BlackGEM en ik ben mede-leider van een groep astronomen die vervolgwaarnemingen vanaf La Palma en vanaf de Europese Zuidelijke Sterrenwacht in Chili doen zodra BlackGEM een lichtflits gevonden heeft. Hierbij gebruiken wij de grootste telescopen op aarde, zoals de Very Large Telescopes en de Gran Telescopio Canarias.

Het hoofddoel van de BlackGEM telescoop is het zoeken naar lichtflitsen in zichtbaar licht die ontstaan bij zwaartekrachtgolfsgebeurtenissen. Hier moet u denken aan zwarte gaten die een neutronenster uit elkaar trekken, of aan twee neutronensterren die op elkaar botsen. Door gebruik te maken van zwaartekrachtgolven én metingen in licht kunnen we de (minimum) draaisnelheid van dat zwarte gat vaststellen.

Dit werkt als volgt: u weet dat de grens van een zwart gat de waarneemhorizon is. Komt een ster voorbij de waarneemhorizon van een zwart gat voordat hij uit elkaar getrokken is dan komt er geen extra licht vrij, hooguit kan men de ster zien verdwijnen, maar op grote afstanden is het licht van één ster vaak niet waarneembaar. Nu is het zo dat de locatie van de waarneemhorizon afhangt van hoe zwaar het zwarte gat is, maar ook van de draaisnelheid van het zwarte gat. Een maximaal-roterend zwart gat heeft een horizon die twee keer zo klein is als die van een niet-roterend zwart gat. De getijdekrachten dichterbij een zwart gat worden snel sterker. Dit heeft tot gevolg dat sommige sterren die door een niet-roterend zwart gat geheel zouden worden opgeslokt, bij een snel draaiend zwart gat wel uit elkaar getrokken zullen worden. De grote stroom van sterstof die naar het zwarte gat valt als de ster uit elkaar getrokken is buiten de waarneemhorizon zorgt dat er veel licht vrijkomt.

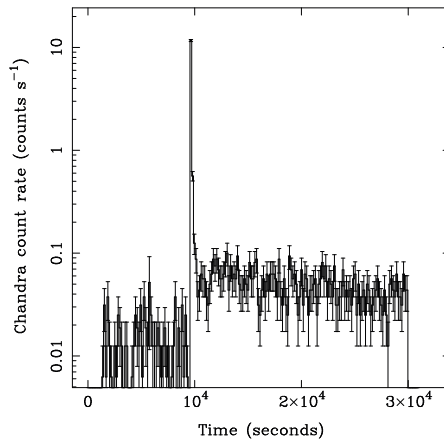
Niet-roterende zwarte gaten zwaarder dan tien keer de massa van de zon zullen een neutronenster in zijn geheel opeten. Hiervan kunnen de zwaartekrachtsgolven gedetecteerd worden maar er zal geen lichtflits te zien zijn. Maar een maximaal roterend zwart gat van tien keer de massa van de zon is twee keer zo klein als een niet-roterend zwart gat en bij het snel-roterende zwarte gat wordt een neutronenster *wel* uit elkaar getrokken buiten de waarneemhorizon! Dus afhankelijk van de draaisnelheid van het zwarte gat zullen we wel of geen lichtflits vinden vlak na een zwaartekrachtgolfgebeurtenis. De komende jaren verwachten we dat de zwaartekrachtgolfdetectoren vele zwart gat – neutronenster interacties zullen detecteren. Met de BlackGEM gegevens zullen we gaan bepalen of er wel of geen lichtflits bij vrijkwam en daarmee zullen we dus iets te weten komen over de draaisnelheid van het zwarte gat.

Door het opeten van sterren en gas wordt een zwart gat zwaarder, maar er zit een grens aan de snelheid waarmee een zwart gat kan groeien door het opeten van gas. Uitgaande van een zekere beginmassa voor een zwart gat, kunnen we daardoor uitrekenen hoe zwaar een zwart gat maximaal kan zijn door het opeten van gas op elk tijdstip in zijn of haar bestaan. Groot was de verrassing toen superzware zwarte gaten van ongeveer een miljard zonsmassa gevonden werden toen het heelal nog slechts zo'n 600 miljoen jaar oud was. Het heelal is nu zo'n 13 miljard jaar oud. Het blijkt dat die zwarte gaten niet uit stellaire zwarte gaten gevormd kunnen zijn: er is eenvoudigweg te weinig tijd om stellaire zwarte gaten zo snel te laten groeien in 600 miljoen jaar tijd. Het groeiproces voor deze superzware zwarte gaten moeten we laten beginnen met zwarte gaten van enkele honderden tot tienduizenden zonsmassa's. Deze noemen we middelzware zwarte gaten.

MIDDELZWARE ZWARTE GATEN

Dit roept meteen een nieuwe vraag op: hoe ontstaan die eventuele middelzware zwarte gaten? Ondanks vele ideeën en modelberekeningen zijn de voorgestelde vormingsmechanismen hiervoor niet onomstreden. Doordat een deel van die middelzware zwarte

gaten niet zal uitgroeien tot superzware zwarte gaten zouden er in het huidige heelal ook nog steeds middelzware zwarte gaten moeten voorkomen. Er is een ware jacht op dit soort middelzware zwarte gaten gaande. Maar hoewel er sterke aanwijzingen zijn voor hun bestaan, is er nog geen sluitend bewijs.



Figuur 8. Het aantal röntgenlichtdeeltjes gemeten door NASA's Chandra satelliet (verticaal) als functie van de tijd op de horizontale as. Duidelijk is de abrupte toename net voor het tijdstip 10000 seconden, de snelle afname hoewel niet tot nul, en tenslotte de geleidelijke afname tot het eind van de waarneming.

Een van de signalen die verklaard zou kunnen worden door een middelzwaar zwart gat is de zogenaamde 'Jonker flits'. Ik ben niet degene die deze term bedacht heeft maar ik neem hem natuurlijk graag over. Dit zijn kortstondige flitsen die we gevonden hebben in röntgenlicht, maar nog niet met licht van andere golflengtes. In het figuur ziet u de snelle toename van de hoeveelheid röntgenlichtdeeltjes die per seconde door de detector van NASA's *Chandra* satelliet werd gedetecteerd. Er zijn twee mogelijke verklaringen voor dit signaal geopperd en voor een hebben we net de simulatie gezien: namelijk het signaal dat uitgezonden wordt bij het uit elkaar trekken van een neutronenster door een klein zwart gat. Het is ook mogelijk dat het signaal opgewekt wordt bij het uit elkaar trekken van een kern van een ster zoals de zon door een middelzwaar zwart gat. Een nieuwe röntgen satelliet, *eROSITA* geheten, wordt naar verwacht in het voorjaar van 2019 gelanceerd en zal gemiddeld elke dag zo'n nieuwe flits vinden. Hopelijk zullen we dan ook de oorzaak van deze flitsen achterhalen.

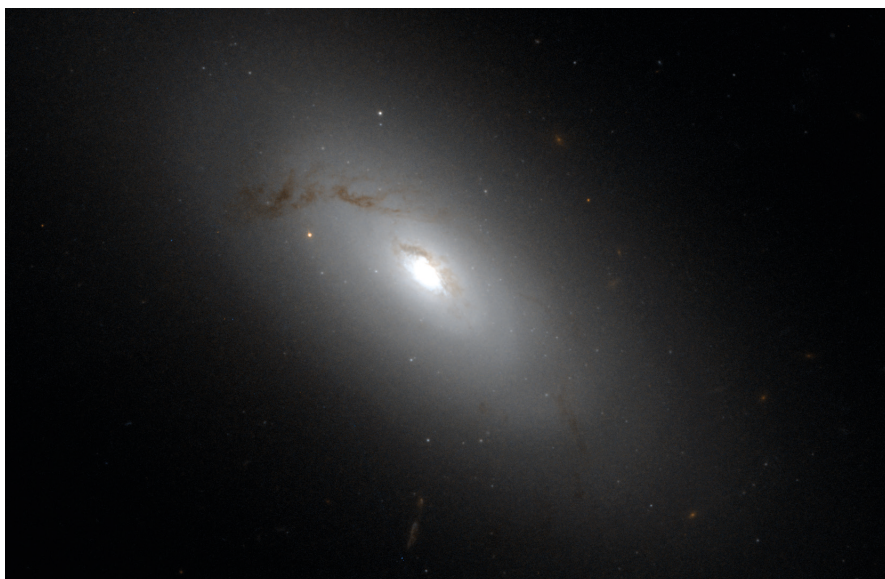
CITIZEN SCIENCE PROJECTEN

Zoals u wellicht begrepen hebt zijn er nieuwe signalen, nieuwe methoden om zwarte gaten te bestuderen, en wellicht vinden we zelfs nieuwe soorten zwarte gaten. Door de combinatie van de bestaande fascinatie voor zwarte gaten, deze enerverende ontwik-

kelingen, en de wens bij te dragen aan het tegengaan van de maatschappelijke tweedeling waar ik het aan het begin over had, is het denk ik een ideaal moment om het publiek nauw te betrekken bij onderzoek aan zwarte gaten. Doordat de artificiële intelligentieprocessen nog niet perfect zijn, en om te helpen het astronomentekort op te lossen gebruiken wij graag mensen zoals u voor burgerwetenschapsprojecten (in het Engels *citizen science projects* genoemd). Een in de sterrenkunde beroemd resultaat van een citizen science project heet Hanny's Voorwerp.

Een Nederlandse schooljuf, Hanny van Arkel, ontdekte een vreemd 'Voorwerp' en dat rapporteerde ze ook zo. Dit staat sindsdien dan ook bekend als 'Hanny's Voorwerp' (ook in het Engels) en Hanny van Arkel werd mede-auteur op het artikel dat de ontdekking en de eerste verklaring voor dit verschijnsel aankondigde. In de verklaring speelt een superzwaar zwart gat een belangrijke rol.

Een mogelijk citizen science project waarbij we gebruik maken van BlackGEM data zou zijn om alle melkwegstelsels die BlackGEM waarneemt te classificeren. We weten namelijk dat een grote fractie van de getijdeflitsen plaatsvindt in bepaalde, relatief zeldzame, melkwegstelsels.



Figuur 9. Een opname gemaakt door de Hubble ruimtetelescoop van het melkwegstelsel met de naam NGC3156. Een onevenredig grote fractie van de waargenomen getijdeflitsen is gevonden in dit soort melkwegstelsels met een grote concentratie van het licht en de sterren in het centrum van het stelsel (figuur gemaakt door Wikimedia Commons auteur Fabian RRRR).

Hier ziet u zo'n melkwegstelsel. Het karakteristieke van dit soort stelsels is dat een zeer groot deel van het licht uit de kern komt omdat daar veel, relatief jonge, sterren voorkomen. Zodra er, later, een lichtflits gevonden wordt in de kern van zo'n melkwegstelsel kun je ervan uitgaan dat het een getijdeflits betreft en de vervolgwarnemingen gelijk starten. De nauwkeurigheid en volledigheid die gehaald wordt bij het identificeren van de juiste melkwegstelsels door artificiële intelligentie ligt slechts rond de 50 procent. Mensen kunnen dit classificeren beter, zo is bekend.

Het opzetten van een citizen science project is niet 1-2-3 gedaan. Ik denk dat de expertise van de afdeling Science in Society van onze faculteit hierbij zeer bruikbaar zal zijn. Ook is een rol weggelegd voor NOVA. In het eerdergenoemde voorstel dat we hebben ingestuurd ter beoordeling in het kader van de Nationale Wetenschapsagenda is ook een belangrijke rol voor citizen science projecten gereserveerd. Nu hoeven we dus alleen nog maar bij de gelukkige 5 procent van de goedgekeurde voorstellen te horen.

DANKWOORD

Voordat ik het woord teruggeef aan de rector wil ik graag nog wat mensen en instanties bedanken. Allereerst de Radboud Universiteit voor de bijzonder hoogleraarpositie die ze voor mij geschapen hebben. Verder ook SRON omdat ze mij de ruimte geven om een deel van mijn ontwikkeling buiten de deur te doen. Mijn sterrenkundecollega's, zowel bij SRON als ook hier bij de Radboud Universiteit, wil ik ook bedanken voor de inspirerende en opbouwende werkomgeving. Naar mijn mening is de openheid en het streven naar wetenschappelijke topkwaliteit zonder de menselijke maat uit het oog te verliezen een belangrijk onderdeel van de kracht van het sterrenkundig onderzoek in Nederland. Daarom wil ik ook mijn collega's van de UvA, Leiden en Groningen bedanken.

Vanzelfsprekend wil ik ook mijn vrienden bedanken. Vriendschap betekent voor ons vaak elkaar sportief uitdagen, klaverjashumor, rugby kijken, lekker eten, wandelen in het bos met onze kinderen en daarna pannenkoeken eten, maar ook: in moeilijke tijden elkaar bijstaan en laten weten dat er mensen zijn op wie je, indien nodig, kunt terugvallen. Dit alles is de afgelopen jaren erg belangrijk gebleken.

Mijn lieve familie, ook zonder jullie steun en liefde zou ik hier niet staan. Papa en mama, het is duidelijk dat mijn dorst naar kennis en wetenschap zijn oorsprong vindt in het voorbeeld dat jullie stelden, ook daarvoor dank. Oscar en Ella, wat ben ik trots op jullie. Jullie, en mama, Monique, zijn het centrum van mijn leven. Monique, de laatste woorden hier zijn voor jou: samen schieten wij vol bij een tekst als *under one sky*, jij ging mee naar Cambridge en Boston, jij verdraagt mijn enthousiaste geleuter over werk, ook als ik laat thuiskom van reizen, jij redigeert mijn voorstellen, jij bent de rots thuis als ik op reis ben, jij maakt mij compleet. Dank je wel.

Ik heb gezegd.

